

УДК 550.461

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД МАЛЫХ ВОДОТОКОВ КУГДИНСКОГО МАССИВА И ЕГО ОБРАМЛЕНИЯ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

Солдатова Евгения Александровна<sup>1,2</sup>,  
2a61@mail.ru

Коньшев Артем Александрович<sup>4</sup>,  
icelopa@gmail.com

Торопов Андрей Сергеевич<sup>3</sup>,  
torop990@gmail.com

Иванова Ирина Сергеевна<sup>5</sup>,  
IvanovaIS\_1986@mail.ru

Сидкина Евгения Сергеевна<sup>2</sup>,  
sidkinaes@yandex.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 19.

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, ул. Ленинские горы, 1.

<sup>4</sup> Институт геологии Карельского научного центра РАН,  
Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11.

<sup>5</sup> Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

**Актуальность.** Активное освоение арктических территорий, а также вопросы, связанные с глобальными изменениями климата, последние несколько десятилетий привлекают внимание ученых из области наук о Земле к исследованию природных особенностей арктических и субарктических территорий России. В северной части Восточной Сибири расположены выходы интрузивных массивов, представляющие собой интерес ввиду перспективности разработки полезных ископаемых. При этом континентальные водные системы этой территории остаются малоизученными. Это связано в большей степени с трудностью доступа к данным мест и практически полным отсутствием инфраструктуры. Исследование состава вод интрузивных массивов является интересной задачей не только с точки зрения объяснения процессов формирования химического состава вод арктических территорий, но также может использоваться для совершенствования методики гидрогеохимических поисков месторождений полезных ископаемых.

**Цель и объект.** Объектом исследования в данной работе являются природные воды Кугдинского ультраосновного-щелочного интрузивного массива, который расположен в западной части Анабарского плато. Целью исследования было изучить химический состав вод поверхностных водотоков, дренирующих непосредственно породы интрузивного массива и зону его обрамления, а также провести их сравнительный анализ с крупными реками региона и выявить закономерности формирования химического состава.

**Методы.** В ходе полевых работ, проведенных в июле–августе 2020 г., были отобраны три пробы воды в пределах Кугдинского массива и его обрамления: поверхностные водотоки, дренирующие Кугдинский массив и ручей, приуроченный к доломитам обрамления. Компоненты карбонатной системы определяли методом потенциометрического титрования, а анионный состав – методом ионной хроматографии. Концентрация растворенного органического углерода определена методом высокотемпературного каталитического окисления. Элементный анализ воды был выполнен методами ICP-AES и ICP-MS. Пробы на элементный анализ были отфильтрованы через мембранный фильтр из полиэфирсульфона с размером пор 0,45 мкм в химически чистые пробирки объемом 15 мл с консервацией 0,45 мл HNO<sub>3</sub> осч.

**Результаты и выводы.** Катионный состав вод щелочного массива и зоны карбонатного обрамления хорошо отражает состав дренируемых ими пород, в то время как их анионный состав контролируется более сложным комплексом как геохимических (включающих не только состав пород, но и их взаимодействие с органическим веществом), так и гидрологических (особенности питания водотоков) факторов. Сравнение химического состава вод малых водотоков Кугдинского массива и его обрамления с водами средних и больших рек региона показало, что особенности катионного состава выражаются в доминирующей роли магния, а также в повышении доли калия по сравнению с натрием. Анионный состав малых водотоков однороден, резко преобладает гидрокарбонат-ион, в отличие от крупных рек, где повышена доля сульфат и хлорид-иона. Содержание микрокомпонентов в поверхностных водах, дренирующих Кугдинский массив и зону карбонатного обрамления, показывают, что потенциально состав вод в пределах данной территории может быть использован как поисковый признак. В водах Кугдинского массива и его обрамления накапливаются такие рудные элементы, как Ni, Zn, Rb. Согласно рассчитанным значениям коэффициента водной миграции преимущественно выносятся из пород Ni, Cu, Zn, Rb, Ag, Pb. По содержанию микрокомпонентов в водотоках, дренирующих щелочные породы, геохимическую специализацию Кугдинского массива можно классифицировать как медно-никелевую.

### Ключевые слова:

Микрокомпоненты, поверхностные воды, коэффициент водной миграции, рудная минерализация, Анабарское плато, Арктика, Кудда, Полярная Сибирь.

## Введение

Активное освоение арктических территорий [1], а также вопросы, связанные с глобальными изменениями климата, последние несколько десятилетий привлекают внимание ученых из области наук о Земле к исследованию природных особенностей арктических и субарктических территорий. Много работ посвящено исследованиям химического состава поверхностных водных объектов, в том числе в контексте антропогенного воздействия и глобальных изменений климата. Подобные работы ведутся на территории Западной [2–5] и Восточной Сибири [6–8], Кольского полуострова [9–12] и в Северной Америке [13–17]. В связи с изучением влияния выбросов парниковых газов на изменение климата проводятся комплексные исследования донных отложений и поровых вод арктических морей [18–20]. В континентальной части арктической и субарктической зоны на территории Восточной Сибири особое внимание исследователей привлекают интрузивные массивы ввиду перспективности разработки полезных ископаемых [21–24]. При этом континентальные водные системы данной территории остаются малоизученными, что связано в большей степени с труднодоступностью мест и практически полным отсутствием инфраструктуры.

Объектом исследования в данной работе являются природные воды Кугдинского интрузивного массива, расположенного в западной части Анабарского плато. В статье приведены новые данные о химическом составе вод поверхностных водотоков, дренирующих непосредственно породы интрузивного массива и зону его обрамления, а также о химическом составе больших и средних рек региона. Проведен сравнительный анализ, и выявлены закономерности формирования химического состава вод. Детальное изучение геохимии природных вод уникальной и труднодоступной территории Анабарского плато является интересной задачей не только с точки зрения познания фундаментальных процессов формирования химического состава вод арктических территорий, но и в контексте прикладной науки – полученные данные могут быть использованы при совершенствовании геохимических методов поиска.

## Описание района исследований и пробоотбор

Район исследований расположен за Северным полярным кругом и является частью Анабарского плато, непосредственно граничащего с полуостровом Таймыр. В административном отношении он представляет Таймырский Долгано-Ненецкий район Красноярского края. Климат района характеризуется суровыми зимами, продолжающимися со второй половины сентября до второй половины мая – начала июня, со средней температурой января  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Устойчивый переход к температурам выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит в июне, наибольшие среднемесячные температуры наблюдаются в июле, достигая в среднем  $12\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$  [25]. Летом выпадает три четверти общего годового количества осадков (порядка  $40\text{--}60\text{ мм}$ ). Их максимум приходится на июль. Территория относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Повсе-

местное их распространение способствует заболачиванию почв и быстрому повышению уровня воды в реках после дождей. Зимой преобладает юго-западный и западный ветер. Летом преобладают северные, преимущественно северо-восточные, ветры, дующие с океана на материк.

Ландшафты представлены лесотундрой и северным редколесьем [26]. Наиболее крупная река района исследований Котуй (в верховьях Сейси) протекает между Анабарским плато и плато Путорана, где она берет свое начало. Севернее, в пределах Северо-Сибирской низменности, при слиянии с р. Хетой образует р. Хатангу. Площадь водосборного бассейна р. Котуй (в совокупности с р. Хатанга) составляет  $364000\text{ км}^2$  по данным Государственного водного реестра. Таким образом, по площади бассейна р. Котуй можно отнести к большим рекам. Опробованная в пределах Кугдинского ультраосновного-щелочного интрузивного массива р. Кугда-Юрях относится к подбассейну р. Котуй и является ее правым притоком. Длина р. Кугда-Юрях составляет порядка  $10\text{ км}$ .

В виду схожих ландшафтно-климатических условий в работе также приводится сравнение изучаемых вод с реками полуострова Таймыр – рр. Пясины, Дудыпта, Тарей. Реки Тарей и Дудыпта относятся к средним с площадью бассейна  $9400$  и  $33100\text{ км}^2$ , соответственно; р. Пясины является большой рекой и характеризуется площадью водосбора  $182000\text{ км}^2$ .

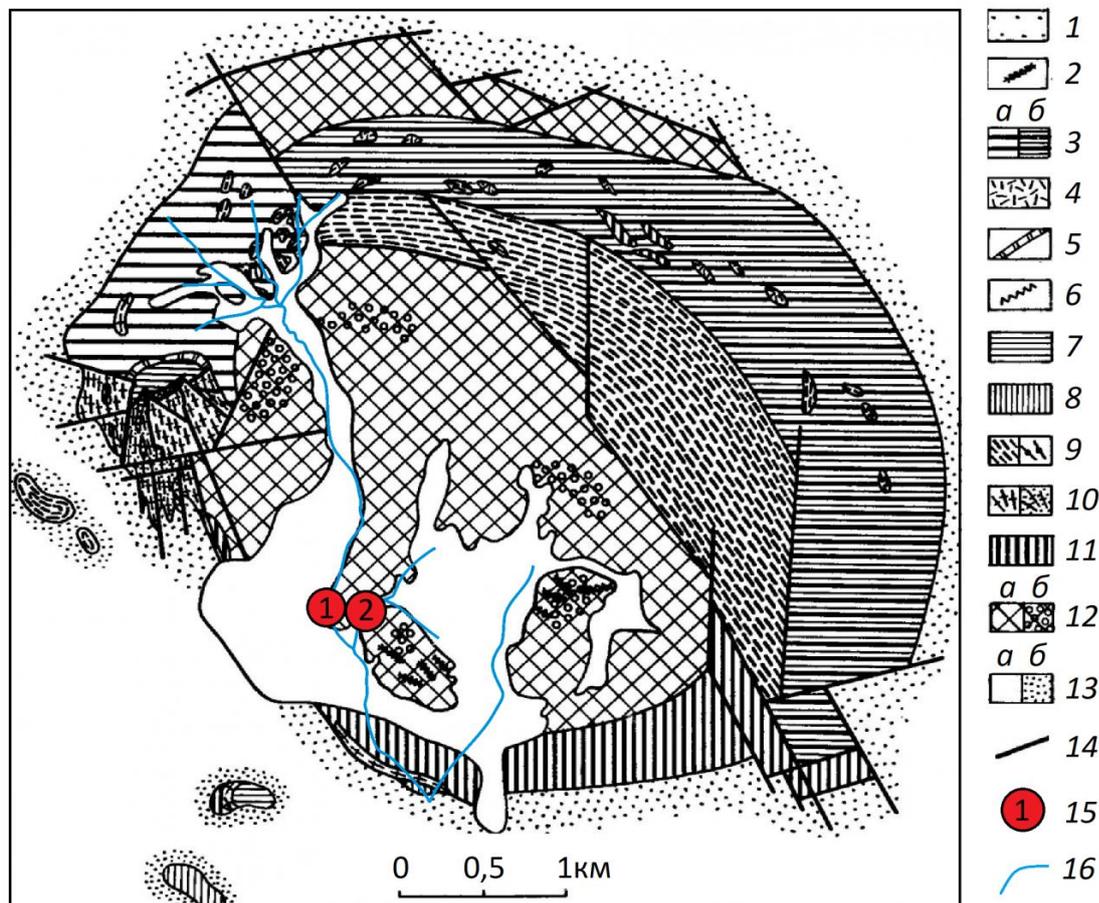
## Геологическое строение

Кугдинский массив относится к Маймечекотуйскому щелочно-карбонатит-ультраосновному комплексу пород, развитому в северо-восточной оконечности большой сибирской магматической провинции, возникшей на рубеже палеозоя и мезозоя. С проявлением магматизма на данном временном отрезке связывают возникновение уникальных Cu-Ni-PGE месторождений Норильского района и сибирских траппов, последние распространены к западу от изучаемого района. Следует также отметить, что массив расположен на пересечении Котуйского и Кугдинского разломов [27].

Рассматриваемый массив прорывает доломиты среднего кембрия, в плане имеет овальную форму, слегка вытянутую в северо-западном направлении, площадь около  $16\text{ км}^2$ , воронкообразную форму и имеет сложное строение (рис. 1). Центральная часть массива размерами  $2\times 3\text{ км}$  представлена штоком оливинитов, также эти породы развиты в виде узкой полосы мощностью до  $500\text{ м}$  в обрамлении массива. Сюда от центрального штока оливинитов развито серпообразное тело мелилитовых пород (оливиновые мелилитолиты, кугдиты, ункомпагриты). Западнее и восточнее центрального штока распространены щелочные породы, часто субэффузивного облика (трахитоидные мельтейгиты, якупирангиты, меланонфелениты, нефелиновые пикриты) – протяжённость неполного кольца этих пород до  $9\text{ км}$  при мощности  $300\text{--}800\text{ м}$ . Форстеритовая брекчия, представленная ксенолитами всех пород массива и сцементированная карбонатизированными и флогопитизированными

форстерититами, развита на северной и восточной периферии массива в виде 500–900 м полосы протяжённостью до 7,5 км. Широкое распространение форстеритовых брекчий на территории интрузивного массива является его отличительной особенностью среди других массивов Маймеча-Котуйского ийолит-

карбонатитового комплекса и всего Анабарского плато. Также в строении массива отмечаются маломощные карбонатитовые жилы, сложенные кальцитом, жилы щелочных и нефелиновых сиенитов, небольшие штоки ийолитов [21, 27].



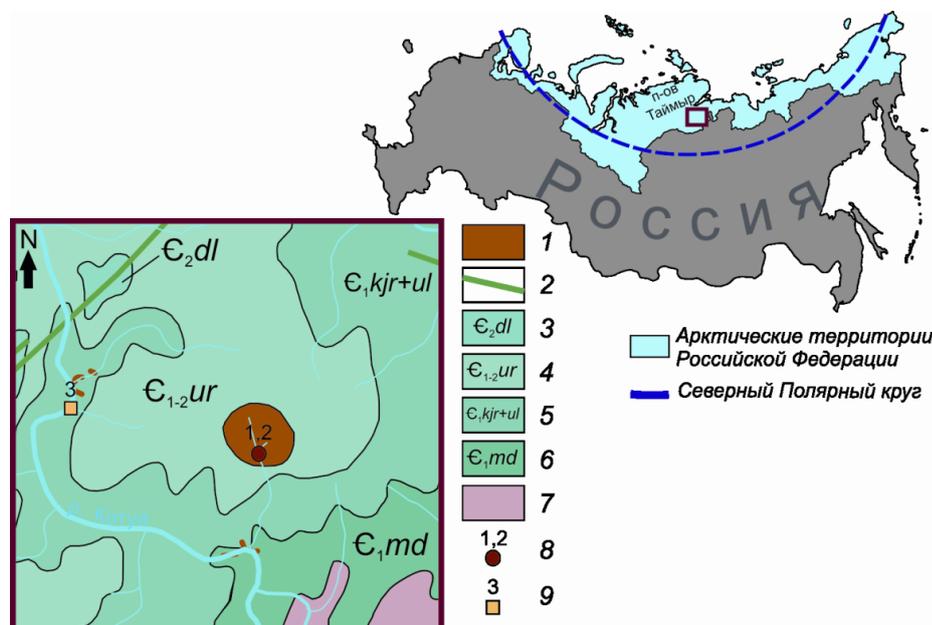
**Рис. 1.** Схема геологического строения Кугдинского ультраосновного-щелочного массива (на основе данных [27]). Условные обозначения: 1 – аллювиальные и флювио-гляциальные отложения; 2 – жилы хризолитоносных пегматоидных оливинитов; 3 – породы фоскоритовой серии с обильными включениями всех более ранних пород массива (а – флогопитизированные форстерититы, б – флогопитизированные форстерититы, кальцит-флогопит-монтичеллитовые (монтичеллититы) и кальцит-флогопит-диопсидовые породы); 4 – меллитизированные якупирангиты и мельтейгиты; 5 – биметасоматические образования на контакте форстеритов со щелочными сиенитами (апофорстерититовые слюдиты и апосиенитовые нефелин-пироксеновые породы); 6 – брекчия щелочных сиенитов с мелкозернистыми флогопит-титанит-пироксеновым цементом; 7 – щелочные эгириновые сиениты; 8 – ийолиты; 9 – порфировые оливинсодержащие фации меланократовых щелочных пород (а – меланефелиниты, оливиновые меланефелиниты и мельтейгиты, б – нефелиновые пикриты и оливиновые мельтейгиты); 10 – якупирангиты-мельтейгиты (а) и их сиенитизированные фации (б); 11 – меллититовые породы (меллитолиты, кугдиты, ункомпагриты); 12 – оливиниты, перовскитовые руды (а) и их фации, обогащенные перовскитом (б); 13 – кембрийские доломиты (а) и их мраморизованные фации (б); 14 – разломы; 15 – точки опробования водных объектов в пределах Кугдинского массива; 16 – реки и ручьи

**Fig. 1.** Scheme of geological settings of the Kugda ultramafic alkaline massif based on [27]. Legend: 1 – alluvial and fluvio-glacial deposits; 2 – veins of chrysolite-bearing pegmatoid olivinites; 3 – rocks of the phoscorite series with abundant inclusions of all earlier rocks of the massif (a – phlogopitized forsteritites, b – phlogopitized forsteritites, calcite-phlogopite-monticellite (monticellites) and calcite-phlogopite-diopside rocks); 4 – melilitized jacupirangites and melteigites; 5 – bimetasomatic rocks at the contact of forsteritites with alkaline syenites (apoforsteritite micaceous rocks and aposyenite nepheline-pyroxene rocks); 6 – breccia of alkaline syenite with fine-grained phlogopite-titanite-pyroxene cement; 7 – alkaline aegirine syenites; 8 – ijolites; 9 – porphyry olivine-bearing facies of melanocratic alkaline rocks (a – melanephelinites, olivine melanephelinites and melteigites, b – nepheline picrites and olivine melteigites); 10 – jacupirangite-melteigites (a) and their syenitized facies (b); 11 – melilite rocks (melilitholites, kugdites, uncompahgrites); 12 – olivinites, ore olivinites (a) and their marbleized facies (b); 14 – faults; 15 – sampling points within Kugda massif; 16 – rivers and streams

Наиболее распространёнными породообразующими минералами массива являются клинопироксен, оливин, нефелин и мелилит. Клинопироксен в целом устойчив в приповерхностных условиях, остальные минералы изменяются под воздействием окружающей среды с образованием вторичных минералов. По оливину образуются минералы группы серпентина (хризотил, антигорит, лизардит и т. п.) и минералы группы гумита

(клиногумит, хондродит). По нефелину развиваются: канкринит, либнерит (мусковит), натролит, возможно, цеболлит. По мелилиту развивается гидромелилит – смесь двух минералов, хуанит и цеболлит.

Контактные изменения вмещающих доломитов выражаются в термальной перекристаллизации в мраморы, содержащие форстерит и периклаз. Мощность контактовых изменений составляет до 300 м [27].



**Рис. 2.** Схемы расположения района исследований и положения точек опробования водных объектов (фрагмент геологической карты из [28]). Условные обозначения: 1 – средне-позднетриасовый Маймеча-Котуйский ийолит-карбонатитовый комплекс; 2 – раннетриасовый Катангский долеритовый комплекс; 3 – среднекембрийские отложения далбыхской свиты (доломиты и глинистые доломиты, часто водорослевые и битуминозные, прослои известковых доломитов и доломитизированных известняков, линзы кремней); 4 – ранне-среднекембрийские отложения урюнгтасской свиты (доломиты светло-серые и коричневато-серые массивные, прослои и линзы известняков); 5 – раннекембрийские отложения кугда-юряхской (известняки, прослоями глинистые и доломитистые, доломиты известковые и глинистые) и улахан-арымасской (доломиты глинистые массивные, линзы известняков, местами водорослевых) свит объединенные; 6 – раннекембрийские отложения медвежинской свиты (кирпично-красные и фиолетово-красные известняки с прослоями мергелей); 7 – протерозойские отложения; 8 – точки опробования водных объектов в пределах Кугдинского массива; 9 – точка опробования ручья, протекающего в пределах карбонатного обрамления

**Fig. 2.** Scheme of the study area and sampling point location (fragment of the geological map from [28]). Legend: 1 – Middle-Late Triassic Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite complex; 2 – Early Triassic Katanga dolerite complex; 3 – Middle Cambrian deposits of the Dalbykh formation (dolomites and clayey dolomites, often algal and bituminous, interlayers of calcareous dolomites and dolomitized limestone); 4 – siliceous Early-Middle Cambrian deposits of the Uryungtasskaya formation (light gray and brownish-gray massive dolomites, interlayers, and lenses of limestones); 5 – Early Cambrian deposits of the Kugdayuryakhskaya (limestones with interlayers clayey and dolomitic, calcareous and clayey dolomite) and Ulakhan-Arymasskaya (massive clayey dolomites, limestone lenses, often algal) formations combined; 6 – Early Cambrian deposits of the Medvezhinskaya formation (brick-red and violet-red limestones with interlayers of marls); 7 – Proterozoic deposits; 8 – sampling points within Kugda massif; 9 – sampling point of the stream within the carbonate margin

#### Полевые исследования

В ходе полевых работ, проведенных в июле–августе 2020 г. в летнюю межень, были отобраны три пробы воды в пределах Кугдинского ультраосновного-щелочного интрузивного массива и его обрамления. Точки 1 и 2 – поверхностные водотоки, дренирующие Кугдинский массив: 1 – верховья р. Кугда-Юрях, ширина в месте опробования около 3 м, глубина до 0,3 м, вода прозрачная, без запаха и вкуса; 2 – безымянный ручей (длина порядка 600 м), впадаю-

щий в р. Кугда-Юрях с востока (ниже по течению от точки 1), ширина в месте опробования 0,5 м, глубина 0,1–0,2 м, вода прозрачная, без вкуса и запаха. Точка 3 – безымянный ручей (длина порядка 5 км), дренирующий доломиты обрамления Кугдинского массива в 5 км к западу от зоны контакта, протекающий по правому берегу р. Котуй в субширотном направлении и впадающий в нее; ширина ручья 2–3 м, глубина 0,15–0,2 м, вода прозрачная, без вкуса и запаха. Схема пробоотбора приведена на рис. 1, 2.

Также в августе 2020 г. (летняя межень) были опробованы крупные и средние реки региона: на полуострове Таймыр (рр. Пяси́на, Дуды́пта, Тарея) и в непосредственной близости от Кугдинского массива (р. Коту́й). Река Коту́й была опробована в нескольких метрах выше по течению от впадения ручья, приуроченного к карбонатному обрамлению (точка 3), в удалении от берега, с лодки. Реки Тарея и Дудыпта опробованы в устьевой части у берега. Река Пяси́на опробована в трех точках – выше впадения р. Дудыпта, выше впадения р. Тарея и в 5 км от своего истока. Опробование проводилось у берега. Данные по рекам приведены для сравнительного анализа химического состава вод малых водотоков Кугдинского массива и его обрамления с региональными особенностями поверхностных вод района.

#### Методы аналитических исследований и обработки данных

Для определения концентраций анионов, растворенной углекислоты и растворенного органического углерода ( $C_{орг}$ ) пробы природных вод были отобраны в пластиковые бутылки объемом 0,5 л с предварительным трехкратным ополаскиванием тары опробуемой водой. Пробы на элементный анализ были отфильтрованы через мембранный фильтр из полиэфирсульфона (PES) с размером пор 0,45 мкм в полипропиленовые стерильные пробирки объемом 15 мл с консервацией 0,45 мл  $HNO_3$  осч.

Компоненты карбонатной системы  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  и  $CO_2$  определяли методом потенциометрического титрования. Анионный состав определялся методом ионной хроматографии на приборе ICS-3000 (Thermo Scientific). Концентрация  $C_{орг}$  определена методом высокотемпературного каталитического окисления

(Vario TOC cube, Elementar). Исследования выполнены в МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва).

Элементный анализ воды был выполнен в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Общую S, Fe, Al, Si, Ca, Mg, Na, K определяли методом ICP-AES (плазменный спектрометр iCAP 6500 DUO (Thermo Scientific)). Содержания остальных микроэлементов определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-series 2 (Thermo Scientific).

При расчете коэффициента водной миграции элементов в водах водотоков, приуроченных к щелочному массиву, и ручья карбонатного обрамления использован средний состав ультрабазитов и метаморфизованных карбонатных пород, соответственно, по данным [29]. Кроме того, для Na, Mg, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Ba коэффициент водной миграции был рассчитан с использованием состава оливинитов Гулинского массива по данным [22], сходных по генезису породам Кугдинского массива и относящихся к одному магматическому комплексу.

Минеральный состав корок вторичных минералов, развивающихся по породам Кугдинского массива, определен с помощью сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе Tescan VEGA II LSH с энергодисперсионным анализатором Vega INCA Energy-350 в КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

#### Результаты

Малые водотоки характеризуются низкой минерализацией, значения которой изменяются от 251 до 329 мг/л (табл. 1). При этом в реках региона ее значение еще ниже и в основном не превышает 100 мг/л. Только в реке Тарея с наименьшей площадью бассейна минерализация составляет 216 мг/л. По значению показателя рН воды ручьев и р. Кугда-Юрях относятся к щелочным, в то время как воды крупных рек являются нейтральными по показателю рН.

**Таблица 1.** Химический состав вод малых водотоков Кугдинского массива и его обрамления, и крупных рек арктической зоны Восточной Сибири

**Table 1.** Chemical composition of waters of small watercourses of Kugda massif, its margin and the large rivers of Eastern Siberia arctic zone

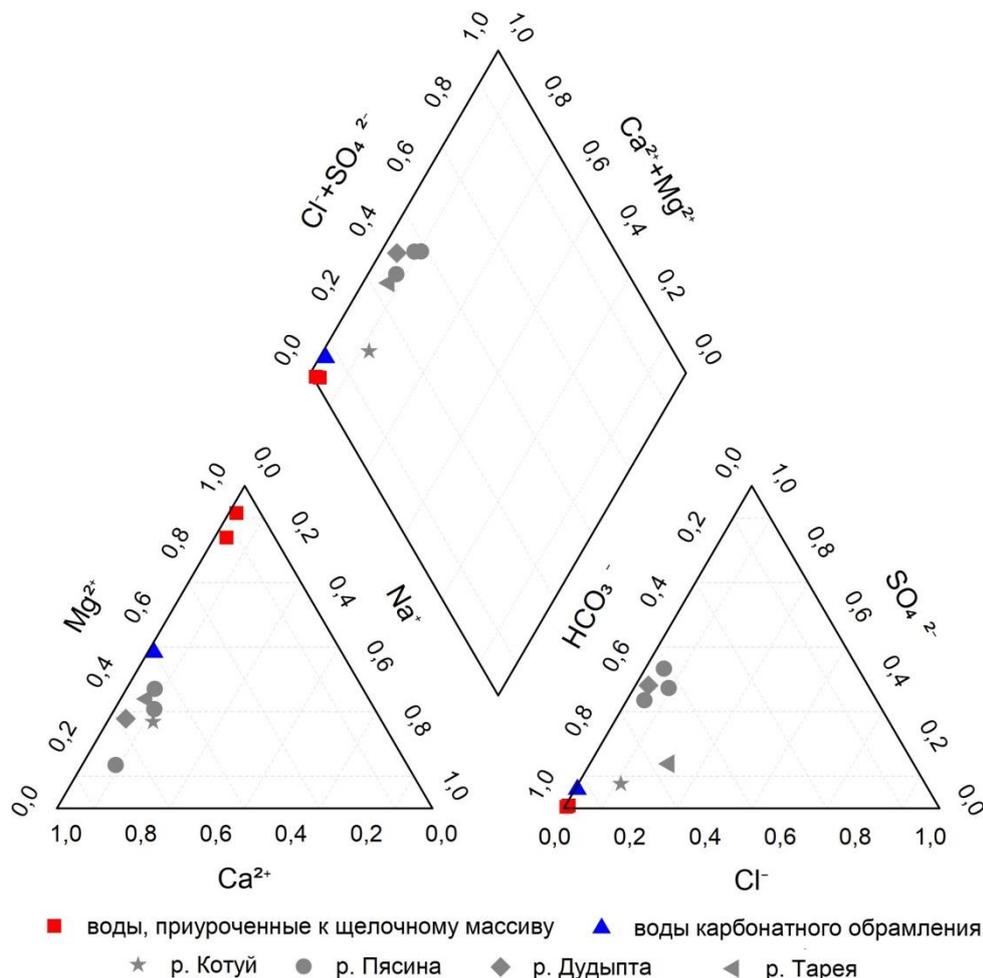
Описание/Description	рН, ед. рН	Содержание, мг/л/ Concentration, mg/L										
		TDS	DOC	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si
р. Кугда-Юрях (точка 1) Kugda-Yuryakh River (sampling point 1)	7,98	244	7,2	6,3	200	1,1	1,2	7,67	30,4	0,64	2,74	10,6
Безымянный ручей, ультраосновной-щелочной массив (точка 2) Stream, the ultramafic alkaline massif (sampling point 2)	8,14	309	7,5**	3,5	259	0,72	0,9	4,78	41,7	0,67	2,09	11,8
Безымянный ручей, карбонатное обрамление (точка 3) Stream, the carbonate margin (sampling point 3)	8,22	278	4,5**	7,0	210	10,4	0,8	34,8	20,6	1,14	0,40	2,09
р. Коту́й/Kotuy River	7,21	89	11,0	10,6	55	4,5	5,0	12,4	3,34	2,81	0,11	2,52
р. Пяси́на, 5 км от истока Pyasina River, 5 km from the headwater	6,92	77	0,52	2,6	34	18,7	3,4	17	1,8	2,15	0,15	1,86
р. Пяси́на (выше впадения р. Дуды́пта) Pyasina River (upstream of Dudypta River)	7,11	62	7,2	4,4	27	17,8	1,5	10	3,2	1,97	0,17	2,08
р. Пяси́на (выше впадения р. Тарея) Pyasina River (upstream of Tareya River)	6,31	69	2,6	2,6	34	14,6	1,5	12	4,9	1,73	0,24	2,14
р. Тарея (устье)/Tareya River (the headwater)	6,98	216	1,7	8,8	105	54	3,6	40	10	2,81	0,38	0,49
р. Дуды́пта (устье)/Dudypta River (the headwater)	7,16	49	10,4	9,7	27	4,5	5,1	8	2,8	0,95	0,24	1,92

Примечание: TDS (total dissolved solids) – значение минерализации как сумма концентраций основных катионов и анионов; DOC (dissolved organic carbon) – растворенный органический углерод ( $C_{орг}$ ). \*\* Присутствует оптически неактивное органическое вещество (возможно, сахара, карбоновые кислоты).

Notes: TDS (total dissolved solids) – the sum of concentrations of the main cations and anions. DOC – dissolved organic carbon. \*\*Optically inactive organic matter is present (possibly sugars, organic acids).

В анионном составе вод малых водотоков резко доминирует гидрокарбонат (табл. 1). Это справедливо и для р. Котуй. Однако здесь наблюдается более высокая концентрации хлорид-иона (свыше 12 мг-экв/% в анионном составе). Также р. Котуй и безымянный ручей, относящийся к карбонатному обрамлению, характеризуются относи-

тельно повышенным содержанием сульфат-иона – до 8,2 мг-экв/%, в то время как в воде р. Кугда-Юрях и впадающего в нее ручья содержание сульфат-иона не превышает 1 мг-экв/%. В реках полуострова Таймыр значительно повышается доля сульфат- и хлорид-ионов, хотя гидрокарбонат-ион остается преобладающим (рис. 3).



**Рис. 3.** Диаграмма Пайпера с данными по химическому составу вод изучаемых малых водотоков и крупных рек арктической зоны Восточной Сибири

**Fig. 3.** Piper diagram with data on the chemical composition of the waters of studied watercourses and large arctic rivers of Eastern Siberia. Legend: red square – waters of the ultramafic alkaline massif; blue triangle – waters of the carbonate margin; grey symbols – waters of large rivers of Eastern Siberia arctic zone (star – Kotuy River, circle – Piasina River, diamond – Dudypa River, triangle – Tareya River)

В катионном составе малых водотоков, который, в отличие от анионного, сильнее связан с составом подстилающих пород, наблюдается ряд особенностей. Так, в малых водотоках, протекающих в центральной части Кугдинского массива (точки 1, 2), резко преобладающим катионом является  $Mg^{2+}$ ; в то же время воды ручья, дренирующего палеозойские карбонатные породы обрамления Кугдинского массива (точка 3), характеризуются смешанным катионным составом, в котором кальций и магний присутствуют приблизительно в равных долях. В водах средних и больших рек преобладает  $Ca^{2+}$ .

Также следует отметить, что в точках опробования 1 и 2, относящихся к Кугдинскому массиву, содержания  $K^+$  достигают значения 2,4 мг-экв/%, в то время

как в точке опробования 3 его содержание составляет только 0,3 мг-экв/%. В водах крупных рек содержание калия тоже низкое и составляет в среднем 0,5 мг-экв/%. Содержание натрия в водах малых водотоков низкое и едва превышает 1 мг-экв/% в водах ручья карбонатного обрамления. По сравнению с водами малых водотоков в водах крупных рек наблюдаются более высокие концентрации натрия (до 12 мг-экв/%). Значение отношения  $rNa/rK$  составляет 0,4–0,5 в водах Кугдинского массива, 4,9 – в водах ручья, дренирующего карбонатные породы. В водах средних и больших рек коэффициент  $rNa/rK$  варьирует от 6,8 (р. Дудыпта) до 43,8 (р. Котуй). Максимальных значений это отношение достигает в водах рр. Пясины и Котуй, площадь бассейна которых превышает 100 тыс. км<sup>2</sup>.

Таким образом, сравнение химического состава вод малых водотоков Кугдинского массива и обрамления с крупными водотоками региона показывает, что локальные особенности формирования катионного состава здесь проявлены в высокой концентрации магния. Воды Кугдинского массива также отличаются низким отношением  $rNa/rK$ .

Содержание кремния значительно выше в водах Кугдинского массива и составляет более 10 мг/л, в то время как в водах крупных рек и ручья, дренирующего карбонатные породы, концентрация кремния едва превышает 2 мг/л.

**Таблица 2.** Содержание микрокомпонентов в изучаемых малых водотоках, мкг/л

**Table 2.** Content of trace elements in the studied water-courses,  $\mu\text{g/L}$

Элемент Element	Точки опробования Sampling points			Кларк речных вод World average for river waters [30]
	1	2	3	
Fe	49,80	15,70	<10	66
Li	0,28	0,29	0,37	1,84
Ti	0,87	<0,9	<0,9	0,489
V	0,26	0,24	0,48	0,71
Cr	0,56	0,74	0,22	0,7
Mn	1,88	1,00	0,17	34
Co	0,12	0,08	0,08	0,148
Ni	10,63	12,84	0,75	0,801
Cu	1,25	0,80	0,69	1,48
Zn	10,92	4,06	1,36	0,6
Rb	4,57	2,55	0,14	1,63
Sr	115,63	69,54	52,30	60
Y	0,04	0,03	0,02	0,04
Zr	0,01	<0,01	0,07	0,039
Mo	<0,02	<0,02	0,06	0,42
Ag	0,14	0,02	0,01	0,3
Ba	109,82	59,75	14,72	23
La	0,03	0,04	<0,002	0,12
Ce	0,05	0,05	0,03	0,262
Pr	0,01	0,01	<0,005	0,04
Nd	0,05	0,04	0,01	0,152
Sm	0,01	0,01	<0,005	0,036
Eu	<0,005	<0,001	<0,001	0,0098
Gd	0,01	0,01	<0,005	0,04
Tb	<0,001	<0,001	<0,001	0,0055
Dy	0,01	<0,005	<0,005	0,03
Ho	<0,001	<0,001	<0,001	0,0071
Er	<0,005	<0,005	<0,005	0,02
Tm	<0,001	<0,001	<0,001	0,0033
Yb	<0,005	<0,005	<0,001	0,017
Lu	<0,001	<0,001	<0,001	0,0024
Pb	<0,05	0,06	<0,02	0,079
U	0,03	0,02	0,22	0,37

Что касается микрокомпонентов, в водах ручья, дренирующего карбонатные породы, концентрации практически всех изученных микроэлементов находятся на уровне кларка речных вод или ниже [30], несколько выше кларка только содержание Zn. Здесь и далее приведено сравнение наших данных с кларком [30], поскольку в открытой печати отсутствует информация о фоновых концентрациях микрокомпонентов в поверхностных водах изучаемого региона.

В водах, дренирующих ультраосновной-щелочной массив, заметно повышены относительно кларковых содержания Ni, Zn и Ba. Несколько выше кларка также и концентрация Rb. Концентрации Ti, V, Cr, Co, Cu, Sr, Y, Pb находятся на уровне кларковых. Содержание остальных изученных элементов (табл. 2) ниже кларка речных вод. Сравнение вод, приуроченных к ультраосновному-щелочному массиву, и вод карбонатного обрамления показало, что воды ультраосновного-щелочного массива содержат более высокие концентрации Fe, Mn, Ni, Zn, Rb, Ag, Ba, Pb, в то время как концентрации Zr, Mo и U выше в водах ручья, приуроченного к карбонатному обрамлению. При этом концентрации U и Zr приблизительно соответствуют кларковым, а концентрация Mo на порядок ниже кларка речных вод. Концентрации редкоземельных элементов выше в водах Кугдинского массива, но не превышают кларковых значений. Верховья реки Кугда-Юрх и впадающий в нее ручей, дренирующий массив, обладают контрастной цериевой аномалией ( $Ce/Ce^*=0,4$  в обоих водотоках,  $Ce^*$  – цериевая аномалия [31]). Следует отметить, что эта аномалия более глубокая, чем ее обычные значения для природных вод [31].

Полученные значения коэффициента водной миграции (рис. 4) показывают, что макрокомпоненты (Ca, Mg, Na, K, S) характеризуются сильной миграционной способностью, которая в целом соответствует рядам миграции, приведенным в [32]. Здесь следует отметить более высокую миграционную способность калия (если учитывать при расчете состав оливинитов Гулинского массива) и меньшую миграционную способность серы. Сравнительная характеристика миграционной способности химических элементов в водах объектов исследований показывает, что Li, K, Mn, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba и Pb лучше выносятся из щелочных пород, в то время как S, Ti, V, Cr, Co, Ni, Zr, U – из пород карбонатного обрамления (рис. 4).

Расчет коэффициентов водной миграции также показал, что в водах, приуроченных к ультраосновному-щелочному массиву, к элементам, характеризующимся очень интенсивной водной миграцией, можно отнести Sr и Ba (табл. 3). Если учитывать средний состав оливинитов Гулинского массива, то к ним также относится калий. Li, Mg, S, Ca, а также Na, если учитывать состав оливинитов, характеризуются сильной интенсивностью миграции. Для Si, Cu, Zn, Rb, Mo, Ag, Pb характерна средняя по интенсивности миграция. Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Y, Zr, U относятся к группе элементов со слабой и очень слабой интенсивностью водной миграции. В водах карбонатного обрамления Na, Mg, S, Ca, U характеризуются сильной интенсивностью миграции (табл. 3). Li, Si, K, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Ag, Ba относятся к элементам, мигрирующим из породы со средней интенсивностью. Слабой и очень слабой интенсивностью миграции характеризуются Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Rb, Y, Zr, Pb.

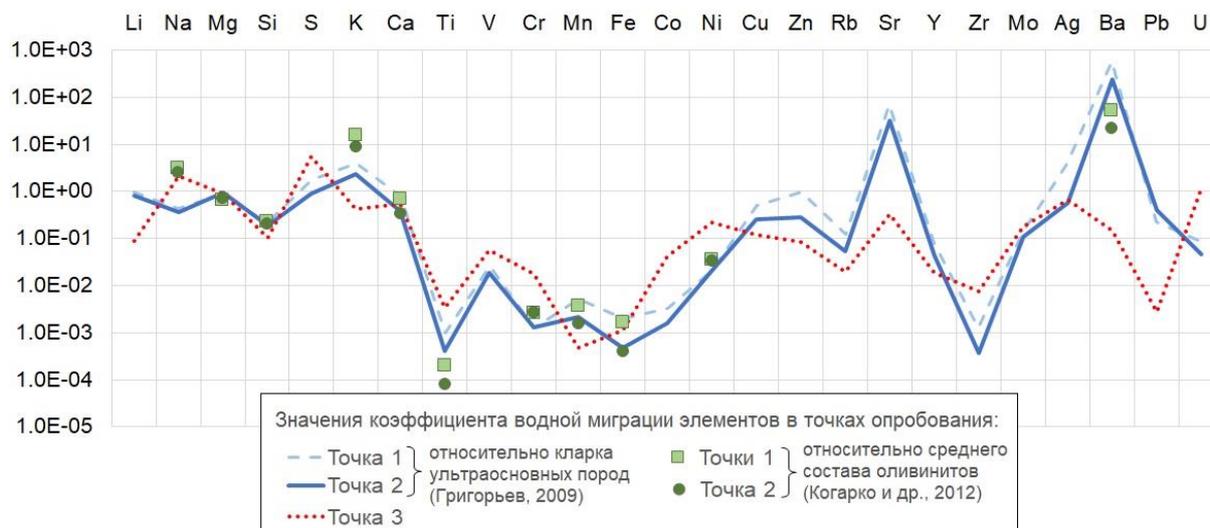


Рис. 4. Значения коэффициента водной миграции химических элементов в водотоках Кугдинского массива и его обрамления

Fig. 4. Values of the water migration coefficient for chemical elements in the small watercourses of the Kugda massif and its margin

Таблица 3. Интенсивность водной миграции химических элементов в изучаемых водотоках

Table 3. Intensity of water migration of chemical elements in the studied watercourses

Интенсивность водной миграции Intensity of water migration	Водотоки ультраосновного-щелочного массива Watercourses of the ultramafic alkaline massif	Ручей, карбонатное обрамление Stream of the carbonate margin
Очень сильная Very strong	<b>Sr, Ba, (K)</b>	–
Сильная/Strong	Li, Mg, S, Ca, (Na)	Na, Mg, S, Ca, U
Средняя/Mean	Si, <b>Cu, Zn, Rb</b> , Mo, Ag, <b>Pb</b>	Li, Si, K, <b>Ni</b> , Cu, <b>Zn</b> , Sr, Mo, Ag, Ba
Слабая и очень слабая Weak and very weak	<u>Ti, V, Cr</u> , Mn, Fe, <u>Co, Ni, Y, Zr, U</u>	Ti, <u>V, Cr</u> , Mn, Fe, Co, Rb, <u>Y, Zr, Pb</u>

Примечания: 1) в круглых скобках указаны элементы, для которых значение коэффициента водной миграции рассчитано с учетом среднего состава оливинитов Гулинского массива; 2) жирным шрифтом отмечены химические элементы, концентрации которых в водах объекта исследований превышают кларк речных вод; 3) подчеркнуты химические элементы, концентрации которых в водах объекта исследований находятся на уровне кларка речных вод.

Notes: 1) elements which water migration coefficients were calculated, taking into account the average composition of olivinites of the Guli massif, are indicated in parentheses; 2) bold type indicates the chemical elements with concentrations above the world average for river waters; 3) underlined chemical elements are the ones, which concentrations are at the world average level for river waters.

### Обсуждение

Повышенные значения pH малых водотоков связаны с составом подстилающих пород: р. Кугда-Юрях (точка 1) и впадающий в нее ручей (точка 2) протекают исключительно по территории Кугдинского массива, безымянный ручей, впадающий в р. Котуй (точка 3), дренирует доломиты обрамления Кугдинского массива. Геохимические же условия крупных

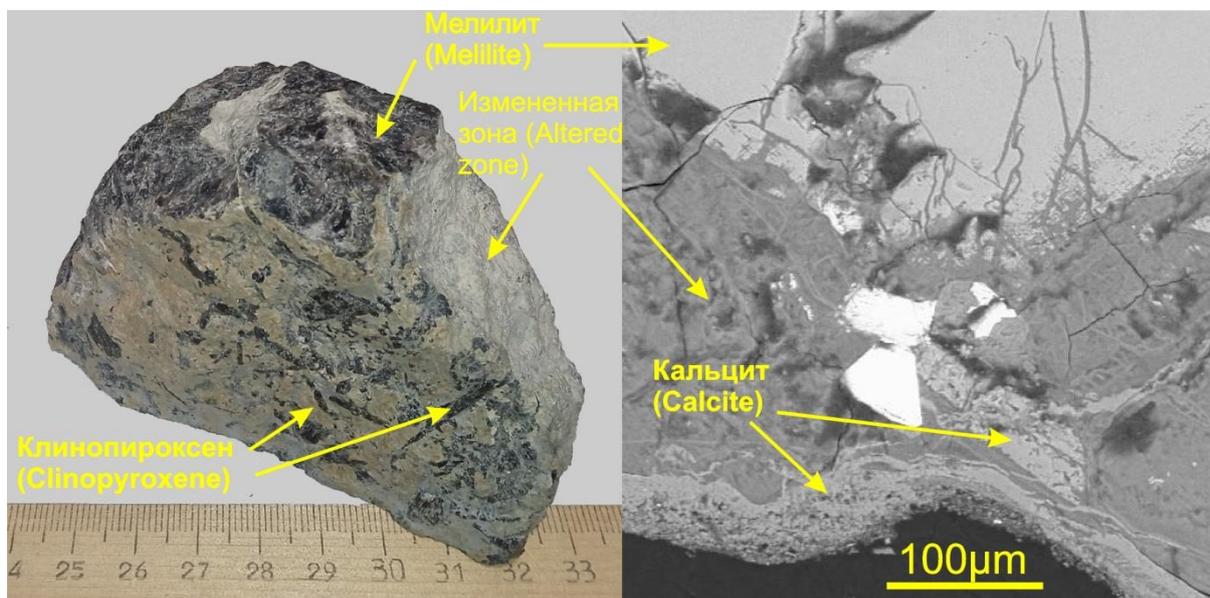
рек района формируются за счет влияния разнообразных факторов, среди которых наибольшее значение в данном контексте, вероятно, оказывают особенности питания.

Преобладание гидрокарбонат-иона в анионном составе является закономерным для маломинерализованных вод тундровых и северо-таежных ландшафтов, характеризующихся развитием многолетнемерзлых пород [33]. Появление сульфат-иона в составе вод ручья, приуроченного к карбонатному обрамлению, может быть обусловлено присутствием рассеянной сульфидной минерализации, нередкой для осадочных пород. Обогащение же сульфат- и хлорид-ионами вод средних и больших рек, вероятно, связано с подтоком солоноватых вод подрусовых таликов, которые характеризуются повышенными концентрациями этих компонентов. Относительно высокая доля сульфат-иона в химическом составе рек полуострова Таймыр также может быть обусловлена масштабной разработкой в этом районе сульфидных месторождений.

Особенности катионного состава вод р. Кугда-Юрях и ручья, впадающего в нее, обусловлены строением и минеральным составом Кугдинского интрузивного массива, сложенного преимущественно породами с Mg-содержащими породообразующими минералами, такими как оливин и мелилит, а также K-содержащими нефелином и псевдоморфозами по ним. Магний и калий характеризуются высокими значениями коэффициента водной миграции [32] и легко переходят из пород в воду. Кроме того, измененные минералы, развивающиеся по первичным минералам, обеднены по магнию, что может являться причиной увеличения содержания Mg в природных водах. В частности, по мелилиту развивается белая корочка (рис. 5), представленная агрегатом Sr-содержащего кальцита и гидроксилсодержащего силиката с непостоянным составом щелочных элементов (вероятно, хуанит и цеболлит). Ca/Mg отношение в мелилите,

главном минерале мелилитолитов, составляет 1,3, в корочке, о которой шла речь выше, – 3,2. Также следует отметить, что еще одним продуктом вторичного изменения оливин-содержащих пород является каль-

цит. Можно предположить, что при выветривании происходит переотложение кальцита, который связывает часть Ca, что приводит к увеличению доли Mg в катионном составе изучаемых вод.



**Рис. 5.** Образец мелилитолита с крупными – до 2–2,5 см в поперечнике – кристаллами меллита из Кугдинского массива с корочкой вторичных минералов (слева). Корочка вторичных изменений по меллиту, представлено в режиме обратно рассеянных электронов (справа)

**Fig. 5.** Sample of melilitolite of the Kugda massif with large, up to 2–2,5 cm in diameter, melilite crystals and a crust of secondary minerals (left side). Alteration rim on melilite, backscattered electron image (right side)

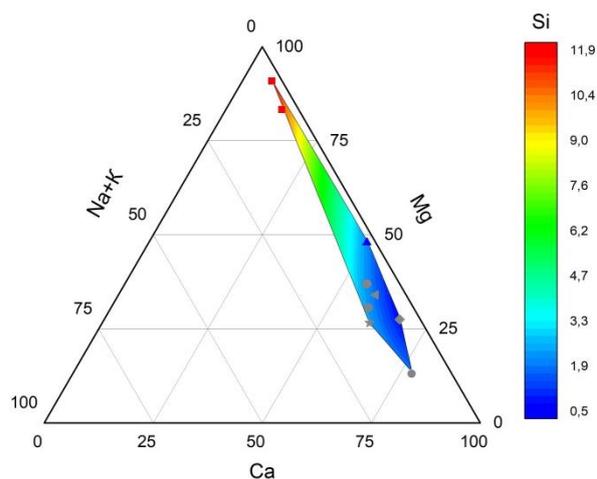
Катионный состав ручья, приуроченного к карбонатному обрамлению, также определяется составом дренируемых пород, которыми являются преимущественно доломиты. Это обуславливает поступление в воду Ca и Mg приблизительно в равных долях.

Катионный состав крупных рек в свою очередь соответствует составу вод провинции маломинерализованных вод тундровых и северо-таежных ландшафтов, характеризующихся развитием многолетнемерзлых пород [33]. Здесь следует отметить, что региональный состав вод различных ландшафтов формируется за счет сложного комплекса факторов, среди которых их биологическая продуктивность, характер преобразования органического вещества, особенности питания вод и другие.

Таким образом, можно заключить, что главным механизмом обогащения катионами вод малых водотоков Кугдинского массива и его обрамления является выщелачивание из коренных пород, в то время как формирование анионного состава крупных рек связано с более сложным комплексом факторов. Это подтверждается и значениями коэффициента  $r_{Na/rK}$ . Низкие его значения в водах, приуроченных к ультраосновному-щелочному массиву, указывают на преобладание здесь процессов выщелачивания. Также на это указывает высокая подвижность калия, особенно в водах Кугдинского массива (табл. 3).

Различия в концентрации кремния в водах, дренирующих ультраосновной-щелочной массив и карбонатные породы обрамления, также обусловлены

главным образом составом пород – Кугдинский массив слагают силикаты, в то время как зона обрамления сложена преимущественно доломитами. Также следует отметить, что поступление в воды кремния очень хорошо согласуется с долей магния в балансе катионов (рис. 6). Это указывает на сходные механизмы поступления в воду этих элементов.



**Рис. 6.** Тройная диаграмма основных катионов (в экв-%) и распределение кремния в изучаемых водах (условные обозначения см. на рис. 3)

**Fig. 6.** Ternary plot of the main cations (in eq-%) and silicon distribution in the studied waters (see Legend in Fig. 3)

Накопление U в водах ручья, дренирующего доломиты обрамления, обусловлено щелочной реакцией водной среды, в которой он хорошо мигрирует и хуже сорбируется на поверхности минералов [34], и сравнительно высокими концентрациями растворенных карбонатных лигандов и фульвокислот, с которыми U склонен образовывать устойчивые комплексные соединения в водном растворе [35, 36]. Здесь также следует отметить, что U в ряду водной миграции относится к элементам, характеризующимся сильной интенсивностью миграции в окислительных условиях зоны гипергенеза [32]. С этим соотносится и полученное для вод карбонатного обрамления значение коэффициента водной миграции (рис. 4, табл. 3). Однако воды, дренирующие ультраосновной-щелочной массив, также характеризуются щелочной средой и достаточно высокой концентрацией бикарбонат-иона, но при этом концентрации U здесь ниже, чем в водах, дренирующих доломиты, а по значению коэффициента водной миграции уран переходит в группу элементов со слабой и очень слабой интенсивностью миграции (табл. 3). Можно предположить, что влияние на обогащение вод U в точке 3 оказывают также особенности состава дренируемых пород. Однако данные о кембрийских карбонатных породах, обрамляющих Кугдинский массив, к сожалению, весьма ограничены.

Накопление в водах ультраосновного-щелочного массива таких рудных элементов, как Ni, Zn, Rb, а также содержания на уровне кларка Ti, V, Cr, Co, Cu, Y, Zr, Ag, Pb в водах объектов исследования при их низкой общей минерализации, вероятнее всего, обусловлены их взаимодействием с породами и в какой-то степени отражают рудную специализацию Кугдинского массива. Значения коэффициента водной миграции указывают на то, что из перечисленных элементов наиболее охотно из пород Кугдинского массива выносятся Cu, Zn, Rb, Ag, Pb, а из пород его карбонатного обрамления – Ni, Cu, Zn, Ag.

В рудах помимо основных рудообразующих элементов почти всегда присутствует широкий спектр сопутствующих элементов-примесей, формирующий геохимическую специализацию потока их рассеяния. Набор элементов, превышающих кларковые значения, сопоставлялся с геохимическими сигнатурами типов оруденения, приведенных в [37, 38]. Сравнительный анализ позволил оценить состав вод Кугдинского массива по геохимической специализации как характерный для ореолов рассеяния медно-никелевого оруденения.

#### **Заключение**

Катионный состав вод Кугдинского ультраосновного-щелочного массива и контактовой зоны хорошо отражает состав дренируемых ими пород, в то время как их анионный состав контролируется более сложным комплексом факторов, включающих не только состав пород, но и взаимодействие с органическим веществом, а также особенности питания водотоков. Сравнение химического состава вод малых водотоков

Кугдинского массива и его обрамления с составом вод средних и больших рек региона показало, что особенности катионного состава выражаются в доминирующей роли магния. Также в водах Кугдинского массива и его обрамления повышена доля калия по сравнению с натрием. Анионный состав малых водотоков однороден, резко преобладает гидрокарбонат-ион, в отличие от крупных рек, где повышается доля сульфат- и хлорид-иона. Таким образом, можно заключить, что для формирования химического состава вод малых водоемов Кугдинского массива и его обрамления существенную роль играет их взаимодействие с подстилающими горными породами, особенно при формировании катионного состава вод.

Содержания микрокомпонентов в поверхностных водах, дренирующих Кугдинский массив и карбонатные породы обрамления, показывают, что потенциально состав вод в пределах данной территории может быть использован как поисковый признак. В водах Кугдинского массива и его обрамления накапливаются такие рудные элементы, как Ni, Zn, Rb. Также наблюдаются достаточно высокие относительно значений минерализации содержания Ti, V, Cr, Co, Cu, Y, Zr, Ag, Pb. Значения коэффициента водной миграции указывают на то, что среди перечисленных элементов наиболее охотно из пород ультраосновного-щелочного массива выносятся Cu, Zn, Rb, Ag, Pb, а из пород его карбонатного обрамления – Ni, Cu, Zn, Ag.

По содержанию микрокомпонентов в водотоках, дренирующих ультраосновной-щелочной массив, геохимическую специализацию Кугдинского массива можно классифицировать как медно-никелевую. Однако следует иметь в виду, что состав поверхностных водотоков отражает состав пород только до глубины эрозионного вреза, если не принимать во внимание возможность их подземного питания, которая затруднена повсеместным распространением многолетне-мерзлых пород. Целесообразно при организации гидрогеохимических поисков на территории района по возможности опробовать выходы подземных вод, а также водотоки, приуроченные к зонам разломов.

*Полевые работы на территории Кугдинского массива и его обрамления проведены при поддержке гранта РФФИ 18-05-70094. Анализ отобранных проб и обработка гидрогеохимических данных, включая изучение поведения элементов рудной специализации, выполнены в рамках Государственного задания лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов ГЕОХИ РАН. Изучение особенностей минерального состава пород выполнено в рамках Госзадания ИГ КарНЦ РАН. Определение органического вещества в пробах воды, а также исследование поведения РЗЭ и урана проведены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60030. Отбор проб воды рр. Пясына, Дудыпта, Тарей и последующий химический анализ выполнены при финансовой поддержке РНФ, проект № 20-77-10084. Авторы также благодарят сотрудников ГЕОХИ РАН Дениса Николаевича Дозадкина и Ирину Николаевну Громяк за помощь в проведении химического анализа воды.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» // Собрание законодательства РФ. – М., 2020. – 35 с. URL: <http://pravo.gov.ru/> (дата обращения 15.11.2021)
2. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: First assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds / I.V. Krickov, A.G. Lim, R.M. Manasyrov, S.V. Loiko, S.N. Vorobyev, V.P., Shevchenko O.M. Dara, V.V. Gordeev, O.S. Pokrovsky // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – V. 269. – P. 429–450. DOI: 10.1016/J.GCA.2019.11.005.
3. Spatial and seasonal variations of C, nutrient, and metal concentration in thermokarst lakes of Western Siberia across a permafrost gradient / R.M. Manasyrov, A.G. Lim, I.V. Krickov, L.S. Shirokova, S.N. Vorobyev, S.N. Kirpotin, O.S. Pokrovsky // *Water*. – 2020. – V. 12. – № 6. – [1830]. DOI: 10.3390/W12061830.
4. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia / O.S. Pokrovsky, R.M. Manasyrov, S.G. Kopysov, I.V. Krickov, L.S. Shirokova, S.V. Loiko, A.G. Lim, L.G. Kolesnichenko, S.N. Vorobyev, S.N. Kirpotin // *Water*. – 2020. – V. 12. – № 6. – [1817]. DOI: 10.3390/W12061817.
5. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia / I. Ivanova, O. Savichev, N. Trifonov, Y.V. Kolubaeva, N. Volkova // *Water*. – 2021. – V. 13. – № 21. – [13107]. DOI: 10.3390/w13213107.
6. Snowmelt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: implications for characterization and flux of river DOC / J. Finlay, J. Neff, S. Zimov, A. Davydova, S. Davydov // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – V. 33. – [L10401]. DOI: 10.1029/2006GL025754.
7. Seasonal changes in the age and structure of dissolved organic carbon in Siberian rivers and streams / J.C. Neff, J.C. Finlay, S.A. Zimov, S.P. Davydov, J.J. Carrasco, E.A.G. Schuur, A.I. Davydova // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – V. 33. – [L23401]. DOI: 10.1029/2006GL028222.
8. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma river: implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use / L.R. Welp, J.T. Randerson, J.C. Finlay, S.P. Davydov, G.M. Zimov, A.I. Davydova, S.A. Zimov // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32. – [L14404]. DOI: 10.1029/2005GL022857.
9. Даувальтер В.А. Геохимия озер в зоне влияния Арктического железорудного предприятия // *Геохимия*. – 2020 – Т. 65. – № 8. – С. 797–810. DOI: 10.31857/S001675252008004X.
10. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Оценка экологического состояния Арктической пресноводной системы по результатам исследований содержания тяжелых металлов в донных отложениях // *Геохимия*. – 2018. – Т. 8. – № 8. – С. 805–819. DOI: 10.1134/S0016752518080034.
11. Базова М.М., Моисеенко Т.И. Миграционная активность элементов в водах озер северо-запада России // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66. – № 10. – С. 938–951. DOI: 10.31857/S0016752521100022.
12. Гусева Н.В., Воробьева Д.А., Евтюгина З.А. Особенности взаимодействия в системе вода-порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 177–188. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2779
13. Dornblaser M.M., Striegl R.G. Nutrient (N, P) loads and yields at multiple scales and subbasin types in the Yukon River basin, Alaska // *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*. – 2007. – V. 112. – [G04S57]. DOI: 10.1029/2006JG000366.
14. Emmerton C.A., Lesack L.F.W., Vincent W.F. Mackenzie River nutrient delivery to the Arctic Ocean and effects of the Mackenzie Delta during open water conditions // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2008. – V. 22. – [GB1024]. DOI: 10.1029/2006GB002856.
15. Seasonal and spatial variability in dissolved organic matter quantity and composition from the Yukon River basin, Alaska / R.G.M. Spencer, G.R. Aiken, K.P. Wickland, R.G. Striegl, P.J. Hernes // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2008. – V. 22. – [GB4002]. DOI: 4010.1029/2008GB003231.
16. Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: A case study of the Yukon River, Alaska / R.G.M. Spencer, G.R. Aiken, K.D. Butler, M.M. Dornblaser, R.G. Striegl, P.J. Hernes // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – V. 36. – [L06401]. DOI: 10.1029/2008GL036831.
17. A decrease in discharge-normalized DOC export by the Yukon River during summer through autumn / R.G. Striegl, G.R. Aiken, M.M. Dornblaser, P.A. Raymond, K.P. Wickland // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32. – [L21413]. DOI: 10.1029/2005GL024413.
18. Характерные особенности молекулярного состава органического вещества осадков моря Лаптевых в районах аномально-го выброса метана / А.А. Гринько, И.В. Гончаров, Н.Е. Шахова, О. Густафссон, Н.В. Обласов, Е.А. Романкевич, А.Г. Зарубин, Р.С. Кашапов, Е.В. Гершелли, О.В. Дударев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, Д.В. Черных // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 4. – С. 560–585. DOI: 10.15372/GIG2019150
19. Исследования состава органического вещества донных осадков моря Лаптевых с применением метода ROCK-EVAL / Е.В. Гершелли, Р.С. Кашапов, А.С. Рубан, И.А. Оберемок, А.А. Леонов, Д.В. Черных, О.В. Дударев, И.П. Семилетов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 189–198. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2780.
20. Накопление органического вещества, тяжелых металлов и редкоземельных элементов в морском осадке на различном расстоянии от дельты реки Индигирка / В.С. Севастьянов, О.В. Кузнецова, В.С. Федулов, В.Ю. Федулова, Н.В. Душенко, С.Г. Наймушин, Я.В. Бычкова, А.П. Кривенко // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 12. – С. 1167–1175. DOI: 10.31857/S0016752520120043.
21. Когарко Л.Н. Закономерности концентрирования и рассеяния циркония и гафния в щелочно-карбонатитовых системах // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 12. – С. 1215–1221. DOI: 10.31857/S0016-752564121215-1221
22. Когарко Л.Н., Рябчиков И.Д., Кузьмин Д.В. Высокобариевая слода в оливинитах Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Сибирь) // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53. – № 11. – С. 1572–1579.
23. Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В. Геохимические индикаторы эволюции щелочно-ультраосновных серий палеозойских массивов фенноскандинавского щита // *Петрология*. – 2013. – Т. 21. – № 3. – С. 277–308. DOI: 10.7868/S0869590313020027.
24. Аносова М.О., Костицын Ю.А., Когарко Л.Н. Связь высококальциевых недосыщенных кремнеземом комплексов Маймеча-Котуйской провинции с сибирскими платобазальтами. Новые данные о возрасте массива Кугда (Полярная Сибирь) // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 12. – С. 1269–1273. DOI: 10.31857/S0016-752564121269-1273.
25. Региональные изменения климата и угроза для экосистем, выпуск 4. Таймырский экорегион / С.Е. Беликов, А.Е. Волков, А.С. Гинзбург, М.В. Глазов, Ю.Н. Голубчиков, Г.В. Груза, В.А. Климанов, А.О. Кокорин, А.А. Минин, А.В. Кожаринов, В.В. Никифоров, Ю.И. Попов, Э.Я. Ранькова, В.А. Спиридонов, А.А. Шепелев. – М.: ООО Изд-во «Русский университет», 2003. – 24 с.
26. Особо охраняемые природные территории Российской Арктики: современное состояние и перспективы развития / под ред. М.С. Стишова. – М.: Скорость цвета, 2013. – 427 с.
27. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). – Л.: Недра, 1991. – 260 с.
28. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Анабаро-Вилуйская серия. Лист R-48 (Хатанга). Карта дочетвертичных образований / под ред. Г.В. Липенкова, М.С. Машак. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015.

29. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
30. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 5–9. – P. 225–272. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.
31. Seto M., Akagi T. Chemical condition for the appearance of a negative Ce anomaly in stream waters and groundwaters // Geochemical Journal. – 2008. – V. 42. – № 4. – P. 371–380. DOI: 10.2343/geochemj.42.371.
32. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1999. – 610 с.
33. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
34. Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report No. 419. – Tsukuba: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005. – 285 p.
35. Торопов А.С., Солдатова Е.А., Рихванов Л.П. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 7–21. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2935
36. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швецов В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
37. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2016. – № 6. – С. 3–72. URL: [http://www.geokhi.ru/DocLib5/publications/Regionalnaya\\_neodnorodnost\\_sostava\\_vod.pdf](http://www.geokhi.ru/DocLib5/publications/Regionalnaya_neodnorodnost_sostava_vod.pdf) (дата обращения 13.10.2021).
38. Smith K.S., Huysck H.L.O. An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals // Reviews in economic geology. V. 6A. The environmental geochemistry of mineral deposits. P. A: Processes, techniques, and health issues / Eds G.S. Plumlee, M.J. Logsdon. – Littleton: Society of economic geologists, 1999. – P. 29–70.

Поступила 10.12.2021 г.

#### Информация об авторах

**Солдатова Е.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Центра изотопной биогеохимии Тюменского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

**Торопов А.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

**Сидкина Е.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, руководитель лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

**Коньшиев А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела минерального сырья Института геологии Карельского научного центра РАН.

**Иванова И.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.461

## CHEMICAL COMPOSITION OF THE SMALL WATERCOURSES OF THE KUGDA MASSIF AND ITS MARGIN (EASTERN SIBERIA)

**Evgeniya A. Soldatova**<sup>1,2</sup>,  
2a61@mail.ru

**Andrey S. Toropov**<sup>3</sup>,  
torop990@gmail.com

**Evgeniya S. Sidkina**<sup>2</sup>,  
sidkinaes@yandex.ru

**Artem A. Konyshov**<sup>4</sup>,  
icelopa@gmail.com

**Irina S. Ivanova**<sup>5</sup>,  
ivanovaS\_1986@mail.ru

<sup>1</sup> University of Tyumen,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

<sup>2</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS,  
19, Kosygin street, Moscow, 119991, Russia.

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory strret, Moscow, 119991, Russia.

<sup>4</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS,  
11, Pushkinskaya street, Petrozavodsk, 185910, Russia.

<sup>5</sup> Tomsk branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of RAS,  
4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**Relevance.** The extensive development of the Arctic territories and global climate change issues have attracted Geosciences researchers' attention to exploring the environmental characteristics of the Russian Arctic and subarctic territories over the past few decades. The outcrops of intrusive massifs in the northern part of Eastern Siberia are of interest due to the prospects for mineral deposits. At the same time, the terrestrial water systems of this region remain poorly studied. Inaccessible location and a virtual absence of infrastructure is the main account. Research of the water chemistry of intrusive massifs is challenging for explaining their formation mechanisms in the Arctic territories and improving hydrogeochemical exploration methods.

**The aim and object.** The research object is the small watercourses draining the Kugda ultramafic alkaline intrusive massif and its carbonate margin located in the western part of the Anabar Plateau. The study aims to investigate the water chemistry and carry out a comparative analysis with the large rivers of the region as well as reveal the consistencies of the chemical composition formation.

**Methods.** During the fieldwork in July–August 2020, three samples from small watercourses draining ultramafic alkaline massif and its carbonate margin were taken. The carbonate system components were determined by potentiometric titration. The anionic composition was determined by ion chromatography. Dissolved organic carbon was measured by the high-temperature catalytic oxidation method. Elemental analysis of water was carried out by ICP-AES and ICP-MS methods. Samples for elemental analysis were filtered through a polyethersulfone membrane of 0,45 µm mesh into analytical pure 15 mL tubes with 0,45 mL of high purity HNO<sub>3</sub> for conservation.

**Results and conclusions.** The cationic content of the studied waters of the ultramafic alkaline massif and its margin reflects the rock composition adequately. At the same time, their anionic composition is controlled by a complex set of factors, both geochemical (rock composition and interaction with organic matter) and hydrological (recharging features). The small watercourse chemical composition draining the Kugda massif and its margin compared to the medium and large rivers of the region revealed the domination of magnesium in the cationic composition and increase in the proportion of potassium in contrast with sodium. The anionic composition of the small watercourses is relatively homogeneous; bicarbonate is sharply dominant, in contrast to large rivers, where the proportion of sulfate and chloride ions increases. The concentrations of trace elements in the surface waters draining the massif and its margin show that the composition of the studied waters can be used as an indicator of ore mineralization. The studied waters are enriched with such ore elements as Ni, Zn, Rb. According to the water migration coefficient values, Ni, Cu, Zn, Rb, Ag, Pb are readily removed from the rocks. Abundancies of trace elements in small watercourses draining alkaline rocks make the geochemical signature which could be classified as copper-nickel mineralization of the Kugda massif.

### Key words:

Trace elements, surface water, water migration coefficient, ore mineralization, Anabar Plateau, Arctic, Kugda, Polar Siberia.

Fieldwork within the Kugda massif and its margin was carried out with the support of the RFBR, project no. 18-05-70094. The water sample analysis and hydrogeochemical data processing were supported by the State Assignment of the Lab of Modeling Hydrogeochemical and Hydrothermal Processes, the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS. The study of the rock mineral composition was carried out in the framework of the State Assignment of Geological Institute of the Karelian Research Centre RAS. Determination of organic matter in the water samples and the study of the REE and U behavior was supported by the RFBR, project no. 19-33-60030. A sampling of Pyasina, Dudypa, Tareya Rivers and subsequent chemical analysis were carried out with the financial support of the RSF, project no. 20-77-10084. The authors are also grateful to Denis N. Dogadkin and Irina N. Gromyak from GEOKHI RAS for help with water chemical analysis.

## REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 26.10.2020 no 645 O strategii razvitiya Arkicheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespechenii natsionalnoy bezopasnosti na period do 2035 goda [Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2020 No. 645 On the strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period until 2035]. Moscow, 2020. 35 p. Available at: <http://pravo.gov.ru/> (accessed 15 November 2021).
2. Krickov I.V., Lim A.G., Manasyrov R.M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V., Pokrovsky O.S. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: First assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450. DOI: 10.1016/J.GCA.2019.11.005.
3. Manasyrov R.M., Lim A.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S. Spatial and seasonal variations of C, nutrient, and metal concentration in thermokarst lakes of Western Siberia across a permafrost gradient. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, [1830]. DOI: 10.3390/W12061830.
4. Pokrovsky O.S., Manasyrov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, [1817]. DOI: 10.3390/W12061817.
5. Ivanova I., Savichev O., Trifonov N., Kolubaeva Y.V., Volkova N. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia. *Water*, 2021, vol. 13, no. 21, [13107]. DOI: 10.3390/w13213107
6. Finlay J., Neff J., Zimov S., Davydova A., Davydov S. Snowmelt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: Implications for characterization and flux of river DOC. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, [L10401]. DOI: 10.1029/2006GL025754.
7. Neff J.C., Finlay J.C., Zimov S.A., Davydov S.P., Carrasco J.J., Schuur E.A.G., Davydova A.I. Seasonal changes in the age and structure of dissolved organic carbon in Siberian rivers and streams. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, [L23401]. DOI: 10.1029/2006GL028222.
8. Welp L.R., Randerson J.T., Finlay J.C., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Zimov S.A. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, [L14404]. DOI: 10.1029/2005GL022857.
9. Dauvalter V.A. Geochemistry of lakes in a zone impacted an Arctic iron-producing enterprise. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no 8, pp. 933–946. DOI: 10.1134/S0016702920080042
10. Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Assessment of the ecological state of the Arctic freshwater system based on concentrations of heavy metals in the bottom sediments. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, no 8, pp. 842–856. DOI: 10.1134/S0016702918080037
11. Bazova M.M., Moiseenko T.I. Migration activity of elements in the water of lakes of northwestern Russia. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no 10, pp. 970–982. DOI: 10.31857/S0016752521100022.
12. Guseva N.V., Vorobeva D.A., Evtyugina Z.A. Features of interaction in the water-rock system: a case study of the Imandra lake catchment (the Kola Peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 177–188. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2779
13. Dornblaser M.M., Striegl R.G. Nutrient (N, P) loads and yields at multiple scales and subbasin types in the Yukon River basin, Alaska. *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, 2007, vol. 112, [G04S57]. DOI: 10.1029/2006JG000366.
14. Emmerton C.A., Lesack L.F.W., Vincent W.F. Mackenzie River nutrient delivery to the Arctic Ocean and effects of the Mackenzie Delta during open water conditions. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, vol. 22, [GB1024]. DOI: 10.1029/2006GB002856.
15. Spencer R.G.M., Aiken G.R., Wickland K.P., Striegl R.G., Hernes P.J. Seasonal and spatial variability in dissolved organic matter quantity and composition from the Yukon River basin, Alaska. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, vol. 22, [GB4002]. DOI: 10.1029/2008GB003231.
16. Spencer R.G.M., Aiken G.R., Butler K.D., Dornblaser M.M., Striegl R.G., Hernes P.J. Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: A case study of the Yukon River, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, [L06401]. DOI: 10.1029/2008GL036831.
17. Striegl R.G., Aiken G.R., Dornblaser M.M., Raymond P.A., Wickland K.P. A decrease in discharge-normalized DOC export by the Yukon River during summer through autumn. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, [L21413]. DOI: 10.1029/2005GL024413.
18. Grinko A.A., Goncharov I.V., Shakhova N.E., Zarubin A.G., Gershelis E.V., Dudarev O.V., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Oblasov N.V., Kashapov R.S., Gustafsson Ö., Chernykh D.V., Romankevich E.A. Sediment organic matter in areas of intense methane release in the Laptev Sea: characteristics of molecular composition. *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 4, pp. 456–477. DOI: 10.15372/RGG2019150
19. Gershelis E.V., Kashapov R.S., Ruban A.S., Oberemok I.A., Leonov A.A., Chernykh D.V., Dudarev O.V., Semiletov I.P. Identifying sources of organic carbon in surface sediments of Laptev sea shelf using a ROCK-EVAL approach. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 189–198. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2780.
20. Sevastyanov V.S., Kuznetsova O.V., Fedulov V.S., Fedulova V.Yu., Dushenko N.V., Naimushin S.G., Bychkova Ya.V., Krivenko A.P. Accumulation of organic matter, heavy metals, and rare-earth elements in marine sediment at different distance from the Indigirka River delta. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 1313–1320. DOI: 10.1134/S0016702920120046
21. Kogarko L.N. Conditions of accumulation and fractionation of zirconium and hafnium in the alkaline-carbonate systems. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 12, pp. 1243–1248. DOI: 10.1134/S0016702919120061
22. Kogarko L.N., Ryabchikov I.D., Kuzmin D.V. High-Ba mica in olivinites of the Guli massif (Maimecha-Kotui province, Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 11, pp. 1209–1215. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.09.007
23. Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V. Geochemical indicators of the evolution of the ultrabasic-alkaline series of Paleozoic massifs of the Fennoscandian shield. *Petrology*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 249–279. DOI: 10.1134/S0869591113020021
24. Anosova M.O., Kostitsyn Y.A., Kogarko L.N. Correlation of high-calcium silica-undersaturated complex of the Maymecha-Kotuy province with Siberian flood basalts: new age data on the Kugda massif (Polar Siberia). *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 12, pp. 1339–1342. DOI: 10.1134/S0016702919120048
25. Belikov S.E., Volkov A.E., Ginzburg A.S., Glazov M.V., Golubchikov Yu.N., Gruza G.V., Klimanov V.A., Kokorin A.O., Minin A.A., Kozharinov A.V., Nikiyforov V.V., Popov Yu.I., Ran'kova E.Ya., Spiridonov V.A., Shepelev A.A. *Regionalnye izmeneniya klimata i ugroza dlya ekosistem. Vyp. 4. Taymyrskiy ekoregion* [Regional changes of climate and danger to ecosystems. Iss. 4. Taymyr ecoregion]. Moscow, Russky universitet Publ., 2003. 24 p.
26. Stishov M.S. *Osobo okhranyaemye territorii Rossiyskoy Arktiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Specially protected natural areas of the Russian Arctic: current state and development prospects]. Moscow, Skorost tsveta Publ., 2013. 427 p.
27. Egorov L.S. *Iyolit-karbonatitovy plutonizm (na primere Maymecha-Kotuyanskogo kompleksa Polyarnoy Sibiri)* [Iolite-carbonate plutonism (on the example of the Maymecha-Kotuy complex of Polar Siberia)]. Leningrad, Nedra Publ., 1991. 260 p.
28. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:1000000. Anabaro-Vilyuskaja seriya. List R-48 (Khatanga). Karta dechetvertichnykh obrazovaniy* [State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:1000000. Third generation. Anabar-Vilyui series. Sheet R-48 (Khatanga). Pre-Quaternary formation map]. Eds. G.V. Lipenkov, M.S. Mashchak. St-Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2015.
29. Grigoriev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in

- the upper part of the continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 2009. 382 p.
30. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 5–9, pp. 225–272. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.
  31. Seto M., Akagi T. Chemical condition for the appearance of a negative Ce anomaly in stream waters and groundwaters. *Geochemical Journal*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 371–380. DOI: 10.2343/geochemj.42.371
  32. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Moscow state university Press, 1999. 610 p.
  33. Shvartsev S.L. *Geokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p.
  34. Takeno N. *Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report No.419*. Tsukuba, National institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005. 285 p.
  35. Toropov A.S., Soldatova E.A., Rikhvanov L.P. Forms of radionuclides (U and Th) migration in natural waters under different geochemical conditions based on computational and experimental data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 7–21. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2935.
  36. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, CentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
  37. Janin E.P., Kuzmich V.N., Ivanitsky O.M. Regionalnaya prirodnyaya neodnorodnost khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod sushi i neobkhodimost ee ucheta pri otsenkakh ikh ekologicheskogo sostoyaniya i intensivnosti tekhnogenogo zagryazneniya [Regional natural heterogeneity of the chemical composition of surface waters and the need to take it into account when assessing their ecological state and the intensity of technogenic pollution.]. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov*, 2016, no 6, pp. 3–72. Available at: <http://www.geokhi.ru/DocLib5/publications/Regionalnaya neodnorodnost sostava vod.pdf> (accessed 13 October 2021).
  38. Smith K.S., Huyck H.L.O. An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals. *Reviews in economic geology. Vol. 6A. The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, techniques, and health issues*. Eds. G.S. Plumlee, M.J. Logsdon. Littleton, Society of economic geologists, 1999. pp. 29–70.

Received: 10 December 2021.

#### Information about the authors

**Evgeniya A. Soldatova**, Cand. Sc., senior researcher, University of Tyumen; senior researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS.

**Andrey S. Toropov**, Cand. Sc., senior researcher, Lomonosov Moscow State University.

**Evgeniya S. Sidkina**, Cand. Sc., laboratory head, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS.

**Artem A. Konyshchev**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS.

**Irina S. Ivanova**, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of RAS.